

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560571

研究課題名(和文) 高炉セメントの化学組成・比表面積を考慮した自己膨張・収縮特性の評価式

研究課題名(英文) Estimation model for autogenous expansion and shrinkage of blast-furnace slag cement considering its chemical composition and fineness

研究代表者

宮沢 伸吾 (Miyazawa, Shingo)

足利工業大学・工学部・教授

研究者番号：10157638

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：製鉄所における副産物である高炉スラグを有効利用した高炉セメントは、環境負荷の観点から利用拡大が期待されている。しかし、高炉セメントを用いたコンクリートは、一般のセメントを用いた場合と比較して、コンクリートの体積変化に起因するひび割れが発生しやすい。そこで、コンクリートの硬化過程での膨張や乾燥に起因する収縮を評価することが重要な課題である。本研究では、高炉セメントの化学組成及び比表面積(粒の細かさ)が膨張・収縮に及ぼす影響を実験により把握し、実用的な評価式を提案した。また、強度増加が速やかで収縮ひび割れの発生しにくい高炉セメントを試作し、新たな汎用型混合セメントとして提案した。

研究成果の概要(英文)：It is expected that blast-furnace slag cement containing blast-furnace slag, which is an industrial by-product in steel production, will be extensively used from a view point of environmental impact. However, cracking due to volume change of concrete occurs more frequently in concrete with blast-furnace slag than in concrete with ordinary Portland cement. Therefore, it is important to estimate expansion during hardening process and shrinkage due to drying of concrete. In this study, influences of chemical composition and fineness of blast-furnace slag cement on volume change were experimentally investigated and a practical estimation equation of autogenous expansion and shrinkage of concrete was proposed. And new blast-furnace slag cement with earlier development of strength and less tendency of shrinkage cracking was experimentally produced and was proposed as general-purpose blended cement.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：高炉セメント 化学組成 比表面積 自己収縮 乾燥収縮 自己膨張 収縮ひび割れ

1. 研究開始当初の背景

(1) 我が国におけるセメントの使用比率は、ポルトランドセメント系が約 75%を占め、残りの約 25%が混合セメントである。混合セメントは、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の産業副産物で置き換えて製造される。そのため、混合セメントの利用拡大は、ポルトランドセメントの使用量の削減に直結し、その結果として、セメント製造過程で排出される CO₂量の削減に寄与する。また、CO₂の排出抑制のみならず、産業副産物を原料の一部に使用していることから、資源の有効利用の観点から、混合セメントの積極的な利用は、今後、より重要な課題になってくると考えられる。

(2) 混合セメントのうち、最も多く利用されているのは高炉セメントである。高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントと比べて断熱温度上昇量が同等かそれ以上となり、自己収縮も大きくなる場合が少なくない。自己収縮においては、高温環境下において特に大きくなることが知られている。したがって、高炉セメントの水和発熱や自己収縮について注意が必要なマスコンクリート構造物に対して広く活用するためには、これらの問題が障害となっている。このような背景のもと、研究代表者は、高炉セメントの JIS 規格の範囲内で化学成分と比表面積を調整することにより発熱及び収縮を抑制した高炉セメントを提案し、実構造物に適用して、温度ひび割れ低減効果について実証してきた。この高炉セメントは、マスコンクリート構造物(部材寸法の大きい主に土木構造物)への利用が有効であるが、硬化過程での温度ひび割れ発生の有無を事前に予測するためには、コンクリートの体積変化(膨張・収縮)を精度良く予測することが必要となる。しかし、この種の高炉セメントを用いた場合の膨張・収縮特性は十分に研究されておらず、膨張・収縮ひずみの予測式も得られていない状況にある。

(3) 高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントと比較して材齢初期での強度発現が遅く、また、コンクリートの収縮に起因するひび割れが発生しやすい傾向にある。そのため、高炉セメントは、土木分野では広く利用されているものの建築分野への利用は地中基礎等を除くと極めて少ないため、その利用比率は国内のセメント使用量の約 20%程度に止まっている。セメント製造における地球環境負荷を低減するためには、高炉セメントの利用比率を増加させることは有効な方策であり、そのためには、鉄筋コンクリート造建物の上部構造を含む幅広い部材に適用できる汎用型の高炉セメントを開発することが期待される。

2. 研究の目的

高炉セメントのコンクリート構造物への用途としては、主として土木構造物を対象とするマスコンクリート構造物、および建築物を含む一般のコンクリート構造物に分類できる。本研究では、これらの用途に適した高炉セメントの開発・普及を視野に入れ、コンクリートのひび割れの発生原因である体積変化挙動を明らかにするとともに、コンクリートの膨張・収縮ひずみの実用評価式を構築することを目的としている。

マスコンクリート構造物を対象とした高炉セメントでは、高炉セメントの化学組成及び比表面積がコンクリートの自己膨張及び自己収縮挙動に及ぼす影響を定式化して、実用評価式を構築する。一般のコンクリート構造物を対象とした汎用型の高炉セメントでは、コンクリートの乾燥収縮挙動に及ぼす高炉セメントの化学組成及び比表面積の影響を明らかにして、収縮ひび割れ抵抗性について従来の汎用セメントの性能と比較検討を行う。

これらの研究成果によって、高炉セメントを用いたマスコンクリート及び建築物を含む幅広いコンクリート構造物の収縮ひび割れ対策の合理化に資することを目的とする。さらに、高炉セメントの利用拡大が促進されることによって、セメント製造過程における CO₂削減及び資源有効利用の促進に資することが期待される。

3. 研究の方法

(1) マスコンクリート構造物(主として土木構造物)を対象とする高炉セメント

硬化過程における発熱及び自己収縮の低減を目的として研究代表者らによって開発された高炉セメントについて、コンクリートの膨張及び自己収縮ひずみに及ぼす高炉スラグの比表面積・置換率・SO₃含有量の影響に着目して室内実験によって評価を行った。すなわち、高炉スラグ微粉末の比表面積が異なる高炉セメントコンクリートの膨張及び自己収縮の挙動評価を行うために 20°C環境及びマスコンクリート構造物を想定した温度履歴をコンクリート供試体に与えて自己膨張・収縮ひずみの測定を行った。

実験によって得られた膨張・収縮ひずみの測定データは、高炉セメントの化学組成及び比表面積に関する要因を変数とした実験式により定式化することとし、高炉セメントコンクリートの新たな膨張・収縮評価式として提案した。

(2) 一般のコンクリート構造物(建築物を含む)を対象とする高炉セメント

セメントクリンカーの鉱物組成を調整することにより、初期強度発現に優れた高炉セメントを試作し、その収縮特性の評価を実験結果に基づいて実施した。特に、クリンカーの主要鉱物であるエーライト(3CaO・SiO₂)の含有量を 70%程度に増大させて製造した高

エーライトセメントを高炉セメントに適用することとし、さらに高炉スラグ微粉末の比表面積の影響に着目することとした。

研究対象とした試作高炉セメントは、エーライトの含有量を 70% 程度に増大させたクリンカーを実機プラントで試作し、これに高炉スラグ微粉末を内割で 20% 置換したものである。この試作高炉セメントの圧縮強度発現性に及ぼす養生温度や乾燥の影響、さらには、自己収縮・乾燥収縮ひずみについて検討した。コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性については、構造物の乾燥条件及び拘束条件を想定した一軸拘束応力試験を実施し、拘束応力の発生状況及び収縮ひび割れ発生日数の測定結果を普通ポルトランドセメント及び通常の高炉セメント A 種を用いた場合と比較し検討を行った。

4. 研究成果

- (1) マスコンクリート構造物(主として土木構造物)を対象とする高炉セメント
 コンクリートの最大膨張ひずみは、高炉スラグ微粉末の混入量が多くなるほど、比表面積が小さくなるほど大きくなり、これらの要因の一次式で評価が可能と考えられる。

コンクリートの自己収縮ひずみは高炉スラグ微粉末の比表面積が大きくなるほど大きくなることが認められ、高炉スラグ微粉末の比表面積を変数とする一次式によって評価することが可能であると考えられる。

高炉スラグ微粉末の比表面積および混入量を変数とする本予測式を用いることで、コンクリートの膨張・収縮ひずみを概ね評価可能であることが認められた。

高炉スラグ微粉末の比表面積を小さくすることでコンクリートの自己収縮ひずみが養生温度が高いほど増大するという温度依存性の傾向が緩和されることが認められた。

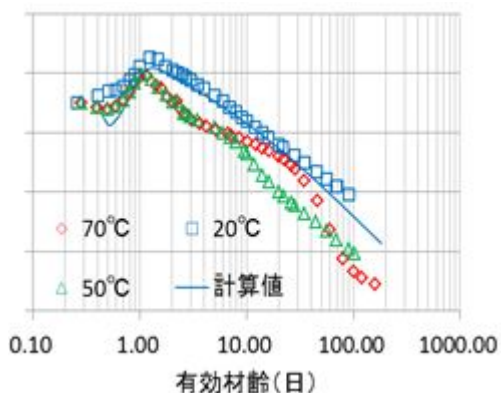


図-1 コンクリートの硬化過程の膨張・収縮(高炉スラグ比表面積：4820cm²/g、高炉スラグ混入率：40%)

- (2) 一般のコンクリート構造物(建築物を含む)を対象とする高炉セメント

高エーライトセメントを用いたコンクリートでは、適切な SO₃ 量を確保すると、初期材齢に数十マイクロ程度の膨張ひずみが生じ、これにより長期材齢における自己収縮の低減が認められた。

高炉スラグ微粉末を混入した場合でも、初期材齢における膨張ひずみが認められた。膨張ひずみの大きさは、高炉スラグ微粉末の比表面積によらず同程度であったが、膨張終了後の自己収縮ひずみは、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいほど大きい傾向が認められた。

高エーライトセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、普通ポルトランドセメントを用いた場合より 80 マイクロ程度小さくなった。なお、高炉スラグ微粉末の比表面積がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は小さかった。

高エーライトセメントを用いた高炉セメントの収縮ひずみは、高炉スラグ微粉末の置換率が 20%程度の場合には普通ポルトランドセメントと同等であり、従来の収縮ひずみ評価式を適用できる。

高エーライトセメントを用いた高炉セメントの収縮ひび割れ抵抗性は、SO₃ 量を若干増加させて 3.4%程度に設定することにより、普通ポルトランドセメントや通常の高炉セメント B 種と比較して優れていることが認められた。

表-1 コンクリートの収縮ひび割れ発生日数

セメント種類	試験体番号		
	No.1	No.2	No.3
普通ポルトランドセメント	30	34	37
高炉セメント B 種	33	38	116
試作高炉セメント	43	71	158

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

宮澤伸吾、横室隆、坂井悦郎、二戸信和、高エーライトクリンカーを用いた高炉セメントの強度発現と収縮ひび割れ抵抗性、セメント・コンクリート論文集、Vol.68、pp.323-329、2015.1

谷田貝敦、二戸信和、宮澤伸吾、坂井悦郎、高 C₃S クリンカーを用いた高炉セメントの諸特性に及ぼす高炉スラグ微粉

末の比表面積の影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.67、pp.296-303、2014.2

谷田貝敦、二戸信和、宮澤伸吾、化学成分を調整した高炉セメントB種の膨張・収縮挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.35、No.1、pp.523-528、2013.7

谷田貝敦、二戸信和、宮澤伸吾、坂井悦郎、鉱物組成を調整したクリンカーを用いた高炉セメントA種の特性、セメント・コンクリート論文集、Vol.66、pp.338-345、2013.2

谷田貝敦・二戸信和・宮澤伸吾、低発熱・収縮抑制型高炉セメントの膨張・収縮挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率およびS03量の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.34、No.1、pp.382-387、2012.7

〔学会発表〕(計8件)

渡辺優介、宮澤伸吾、高炉セメントの初期強度の改善に関する研究、JCI 関東支部栃木地区研究発表会、2015.3.3、宇都宮大学(宇都宮市)

諸田賢也、宮澤伸吾、混合セメントを用いたコンクリートの中性化および凍結融解抵抗性、JCI 関東支部栃木地区研究発表会、2015.3.3、宇都宮大学(宇都宮市)

S. Miyazawa, Current trend and issues of blended cement for low-carbon concrete, International Workshop on Concrete Sustainability, invited lecture, 2014.3.7-8, JR Hotel Clement Takamatsu (Takamatsu)

垂石裕貴、石井秀幸、佐藤博紀、宮澤伸吾、汎用セメントへの高炉スラグ微粉末やフライアッシュの有効利用に関する研究、JCI 関東支部栃木地区研究発表会、2014.3.3、小山工業高等専門学校(小山市)

佐藤博紀、宮澤伸吾、高エーライトクリンカーを用いた高炉セメントの特性、JCI 関東支部栃木地区研究発表会、2014.3.3、小山工業高等専門学校(小山市)

垂石裕貴、宮澤伸吾、横室隆、坂井悦郎、鯉淵清、二戸信和、谷田貝敦、高エーライトクリンカーを用いた高炉セメントの諸特性、第40回土木学会関東支部技

術研究発表会、2013.3.14-15、宇都宮大学(宇都宮市)

谷田貝敦、二戸信和、宮澤伸吾、高温履歴条件下における高炉セメントの拘束応力に及ぼす自己膨張・収縮の影響、土木学会第65回年次学術講演会、2012.9.5-7、名古屋大学(名古屋市)

垂石裕貴、宮澤伸吾、坂井悦郎、鯉淵清、クリンカー組成の異なる高炉セメントの強度及び収縮特性、土木学会第65回年次学術講演会、2012.9.5-7、名古屋大学(名古屋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮澤 伸吾(Miyazawa, Shingo)
足利工業大学・工学部・教授)
研究者番号：10157638